

температуры потоков и подобрать более подходящее оборудование для энергоэффективной работы.

Список использованных источников

1. Денисов М. А. Автоматизированное проектирование в ANSYS и в КОМПАС-3D: учебное электронное текстовое издание. Екатеринбург : УрФУ, 2015.
2. Королев В. Н. Тепломассобмен: учебное пособие; Екатеринбург : УрФУ, 2013. 250 с.
3. Сапожников Б. Г. Тепломассобмен: учебное пособие; Екатеринбург : УрФУ, 2008. 188 с.

УДК 536.423

**РАСЧЕТ СКОРОСТИ ИСПАРЕНИЯ КАПЕЛЬ ВОДЫ В
ПОТОКЕ ПЕРЕГРЕТОГО ВОДЯНОГО ПАРА**

**CALCULATION OF THE RATE OF EVAPORATION OF WATER
DROPLETS IN A STREAM OF SUPERHEATED WATER VAPOR**

Жорнова О. Н., Гальперин Л. Г.

Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург,
Olgazhornova@mail.ru, lhalp@k66.ru

Zhornova O. N., Halperin L. G

Ural Federal University, Ekaterinburg

Аннотация: Исследовано влияние используемого уравнения состояния пара на расчетные значения скорости испарения неподвижной капли того же вещества. Приведены примеры расчета времени испарения капель воды в перегретом паре в области температур и давлений, характерных для впрыскивающих пароохладителей, редукиционно-охладительных установок (РОУ) и быстродействующих редукиционно-охладительных установок (БРОУ).

Abstract: Influence of the state steam equation on calculated parameters of vaporization rate in case of a fixed drop is investigated.

Examples are given for calculation of vaporization rate of water drops in superheated steam in area of temperature and pressure which is typical for direct-contact desuperheaters, pressure-reducing and desuperheating system (PRD) and fast-response pressure-reducing and desuperheating system (FPRD).

Ключевые слова: *впрыскивающий пароохладитель, редуционно-охладительная установка (РОУ), быстросействующая редуционно-охладительная установка (БРОУ), испарение капель.*

Key words: *direct-contact desuperheaters, pressure-reducing and desuperheating system (PRD), fast-response pressure-reducing and desuperheating system (FPRD), droplet evaporation.*

Регулирование температуры пара впрыском жидкости в поток широко применяется в энергетике, криогенной технике, аэродинамике. Расчет процесса испарения капель влаги в паре того же вещества зачастую в целях упрощения расчетов основывается на предположении об «идеальности» пара, подчиняющегося уравнению состояния Клапейрона-Менделеева. Между тем, эффекты, связанные с учетом отклонения свойств пара от «идеальности» могут оказаться весьма заметными и существенно повлиять на величину скорости и времени испарения капель. В работе [1] расчет указанных величин выполнен для случая испарения капель жидкого азота в криогенной аэродинамической трубе. В предлагаемой работе приводятся результаты учета влияния реальных свойств водяного пара на процесс испарения капель влаги.

Основные положения модели аналогичны предложенным в работе [1]. Вследствие существенного различия плотностей влаги и пара скорость радиального перемещения поверхности капли в процессе испарения много меньше скорости потока пара, что позволяет считать процесс испарения квазистатическим. Считая каплю неподвижной относительно переносного потока, что приближенно справедливо для достаточно мелких капель, запишем систему уравнений баланса массы и энергии для сферически

симметричного течения пара в окрестности испаряющейся частицы ($r > r_p$):

$$\rho \cdot v \cdot r^2 = q_m \cdot r_p^2 ; \quad (1)$$

$$\rho \cdot v \cdot \frac{dh}{dr} = \frac{1}{r^2} \cdot \frac{d}{dr} \cdot (r^2 \cdot q_T), \quad (2)$$

где q_m – плотность потока массы пара на поверхности частицы, текущий радиус которой равен $r_p(\tau)$; $h = h(p, T)$ – удельная энтальпия пара: перегретого пара h_{nn} , насыщенного пара h_n , воды на линии насыщения h_g ; ρ, p, T – параметры состояния пара: плотность, давление, температура; v – радиальная скорость пара; q_T – диффузионный поток тепла, $q_T = \lambda \frac{dT}{dr}$.

Течение пара в окрестности частицы считается достаточно медленным по сравнению со скоростью звука в паре ($v \ll c$), так что давление в пространстве вне частицы можно считать постоянным ($p = p_\infty$).

Граничные условия к системе (1, 2) на поверхности капли и вдали от нее формулируются аналогично [1]; молекулярными эффектами у поверхности капли пренебрегаем (слой Кнудсена у поверхности испаряющейся частицы, приводящий к возникновению скачков параметров состояния, пренебрежимо мал ($l_k \ll r_p$)):

$$r = r_p; T = T_s(p_\infty); L = L(p_\infty) = h_n - h_g; -Lq_m = -\lambda \frac{dT}{dr} = -\rho_f \frac{dr_p}{d\tau};$$

$$r \rightarrow \infty; T = T_\infty; \rho = \rho_\infty; v \rightarrow 0.$$

Здесь $L = L(p_\infty)$ – удельная теплота парообразования; $\rho_f = \rho_f[T_s(p_\infty)]$. Индекс f соответствует параметрам сред в конденсированном состоянии.

Интегрируя уравнение (1) с учетом уравнения (2), получим

$$q_m r_p \left(1 - \frac{r_p}{r}\right) = \int_{T_a}^T \frac{\lambda dT}{L + h_{nn} - h_n} = \int_{T_a}^T \frac{\lambda dT}{h_n - h_g} \equiv I(T). \quad (3)$$

Отсюда динамика изменения размера капли определяется выражением

$$r_{0p}^2 - r_p^2 = \frac{2 \cdot I(T_\infty)}{\rho_f} \tau$$

и время полного испарения капли в идеальном и реальном газе:

$$\frac{\tau}{r_{0p}^2} = \frac{\rho_f}{2 \cdot I(T)}.$$

Расчеты энтальпии перегретого пара вдали от частицы насыщенного пара у ее поверхности и воды на линии насыщения производится согласно выражениям [2].

Ниже изложены результаты расчетов для пара в области температур и давлений, характерных для РОУ и БРОУ $180 \leq T_\infty \leq 540^\circ\text{C}$, $0,7 \leq p_\infty \leq 1,1 \text{ МПа}$.

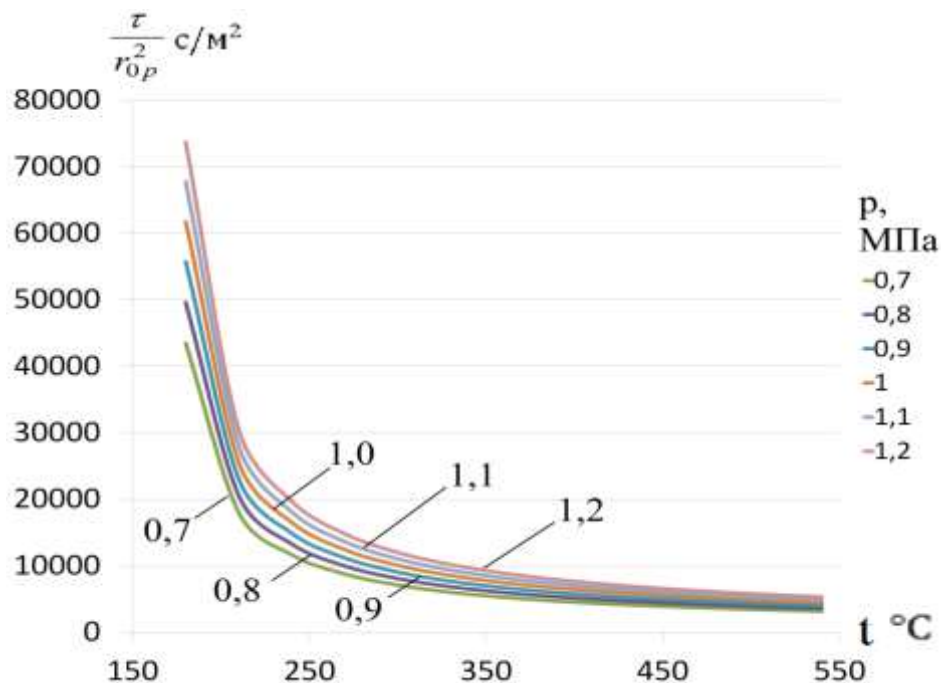


Рис. 1. Результаты расчета зависимости времени полного испарения капли воды

$$\frac{\tau_0}{r_{0p}^2} \rightarrow T^\circ\text{C}$$

На рис. 1 в координатах $\frac{\tau_0}{r_{0p}^2} \rightarrow T^\circ\text{C}$ представлены результаты расчета зависимости времени полного испарения капли воды τ_0 от температуры и давления окружающего пара (параметр кривых в МПа), построенной в рамках модели идеального газа.

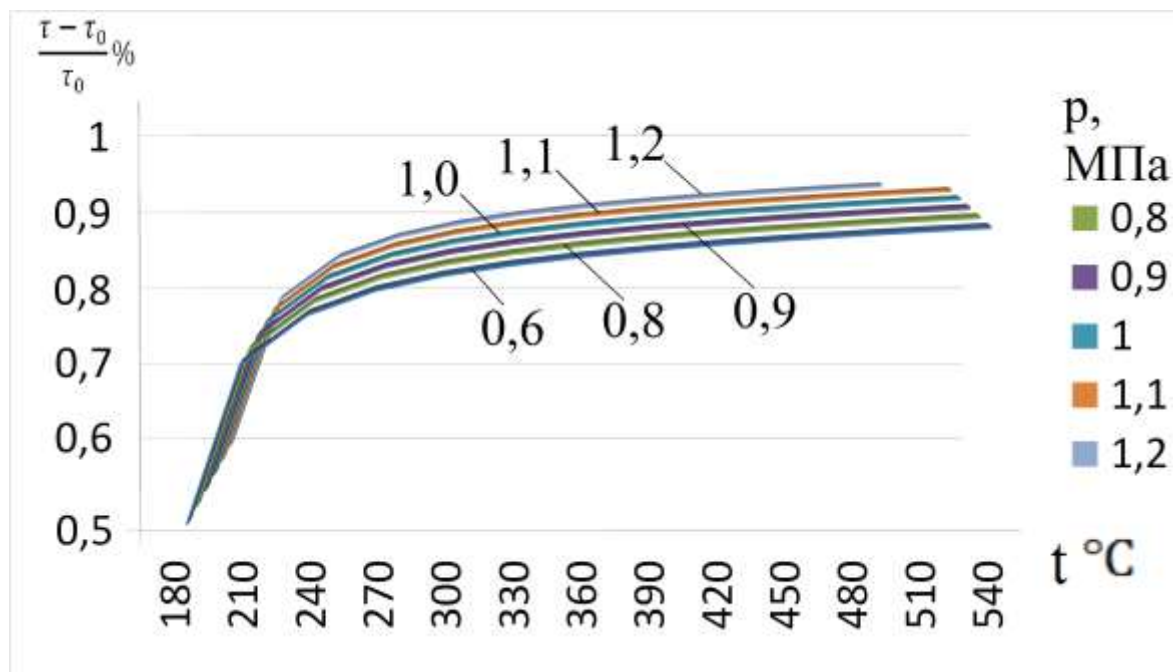


Рис. 2. Зависимость относительного отклонения времени испарения капли

Влияние «неидеальности» пара отражено на графике (рис.2), где приведена зависимость относительного отклонения времени

$$\frac{\tau - \tau_0}{\tau_0}$$

испарения капли τ_0 от температуры и давления (τ – расчетное время испарения капли в модели реального газа). Аналогично [1] при фиксированном давлении относительное отклонение длительности полного испарения проходит через максимум. При понижении температуры пара к температуре насыщения отклонение стремится к нулю (капля прекращает испаряться) и уменьшается с ростом температуры пара, когда отклонение его реальных свойств от модели идеального газа становится менее существенным. В целом учет реальных свойств пара приводит к небольшому уточнению времени испарения капель влаги. В частности, для температур и давлений, характерных для работы РОУ ТЭС отклонение составляет 10^{-5} .

Следует отметить, что приведенные результаты получены в рамках предположения о диффузионном механизме подвода тепла от окружающего пара к поверхности частицы. Между тем, в потоке пара присутствует скольжение капель относительно потока и соответственно наличие конвективной составляющей теплового

потока. Вклад этой компоненты возможен в предположении о малой скорости потока пара относительно капли, $Nu \approx 2$.

В промышленных технологиях впрыскиваемая влага является дисперсной системой, время полного испарения которой отличается от рассчитанного в данной работе. Расчет времени испарения полидисперсной системы капель можно осуществить с привлечением алгоритма, представленного в работе [3].

Список использованных источников

1. Карпова Г. А., Стасенко А. Л. Влияние реальных свойств пара на время испарения капли // Ученые записки ЦАГИ. 1982. Т. XIII. № 6. С. 101–105.
2. Теплообменники энергетических установок / под общ. ред. Ю. М. Бродова. Екатеринбург : Сократ, 2003. 965 с.
3. Бувеч Ю. А., Ясников Г. П. О кинетике растворения полидисперсной системы частиц // ТОХТ. 1982. Т. XVI. № 5. С. 597–603.

УДК 621.311.1.003

ПРИМЕНЕНИЕ МОДЕЛИ ЭНЕРГО-СТОИМОСТНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДЛЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТАРИФНЫХ МОДЕЛЕЙ НА ПЕРЕДАЧУ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

APPLICATION OF THE ENERGY-VOLUME DISTRIBUTION MODEL FOR IMPROVING TARIFF MODELS FOR ELECTRICITY TRANSMISSION

Зубарев В. С., Белоусов И. А., Паздерин А. В., Паздерин А. А.,
Шевелев И. В.

Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург,
vitek.z@mail.ru, ivan.blsv@mail.ru, a.v.pazderin@urfu.ru

Zubarev V. S., Belousov I. A., Pazderin A. V., Pazderin A. V.,
Shevelev I. V.

Ural Federal University, Ekaterinburg